

# カンアオイの遺伝子に刻まれた 「虫を騙す香り」

奥山雄大

おくやま ゆうだい

国立科学博物館 植物研究部 多様性解析・保全グループ 研究主幹

「臭い花」はなぜ臭いのか——幸運なことに最近筆者らは、この興味深い問いの答えとなるような科学的発見にたどり着いた。しかし多くの人はこの問いかけを耳にしたとき、そもそも臭い花とはなんぞや？ という疑問を想起するのではなからうか。実際には花の香りは様々であり、花に普段から関心をもっている人であれば、中にはいい香りとは言えないものもいくらか存在することはご存じであろう。本論考では、そもそも臭い花とはどのような存在か、そしてなぜ臭い花が存在するのか、という視点から話を始めたい。

## なぜ「臭い花」が存在するのか

好ましいものの象徴として捉えられることも多い花は、本来人の目を楽しませるために存在するのではない。地球上に30万種以上が知られている現生の被子植物(花を咲かせる植物)のうち87.5%は昆虫などの動物によって送粉される(動物媒)と推定されている<sup>2</sup>。言うなれば花はこれら花粉を運ぶ動物(送粉者)に対して咲いているということになる。このことは花の色、姿形、そして香りといった形質は送粉者の性質に合わせて適応進化を遂げてきたことを意味しており、したがって花の多様性とは送粉者の多様性によって裏打ちされたものだと考えられる。花の進化の仕組みを理解するためには、送粉者側の生物学的特性の理解が欠かせない。ここが花の進化研究の難しさであり、また筆者を惹きつけてやまない魅力でもあるのだ。

送粉者となる動物には様々なものが知られているが、主流となるのはやはり蜜や花粉を求めて花を訪れる習性が強い動物、特に昆虫類である。これらの昆虫類にはハナバチの仲間、ハナアブの仲

間、チョウ・ガの仲間、そして甲虫類などがあり、それぞれの昆虫のグループの知覚特性に対応した姿形、香りの花が存在するが、おしなべてこれらの送粉者と呼ぶ花に人が美しい、あるいは好ましい香りと感じるものが多いようだ(図1)。

一方で、樹林下や谷沿いといった暗く、気温が低い場所ではハナバチやチョウといった昆虫は比較的乏しく、そのような環境で特に送粉者としての重要度が高くなるのがハエの仲間(ハエ目昆虫:以下、ハエと表記した場合はハエ目昆虫全般を指すこととする)である。ハエの仲間は嗅覚も発達しており、彼らに送粉される花(ハエ媒花)は香りも発達させていることが多いが、ハエの多くは腐食性であり、それらが好む香りには人にとっては好ましくないものも多い。これが臭い花が進化する所以というわけである。

さらに一歩進んで、そもそも花を訪れる習性(訪

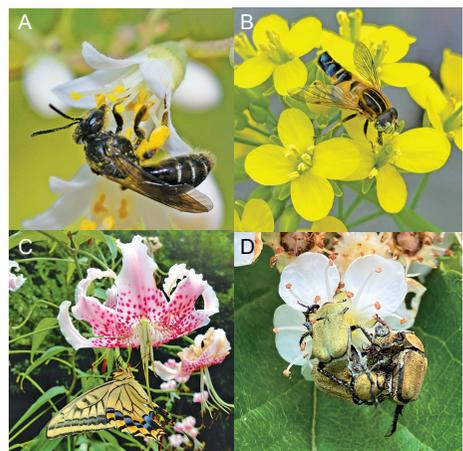


図1—蜜や花粉を求めて花を訪れる昆虫

A: ウツギの花を訪れるウツギノヒメハナバチ B: コマツナの花を訪れるアシトハナアブ C: カノコユリの花を訪れるキアゲハ D: カマツカの花を訪れるアシナゴガネ

花性)のある昆虫を誘引することをやめ、本来花を訪れない昆虫を送粉者とするようになった植物が存在する。これが「擬態する花」、すなわち花ではないものに擬態し、それを求めてやってくる昆虫を騙して送粉させる花である。このような植物の進化は、送粉者として一般的な昆虫が乏しい、あるいは花蜜などの報酬が相対的に高コストになるなどの生態的条件におそらく起因すると考えられるが詳細は不明である。ここで送粉者となる昆虫、すなわち騙される相手として、なぜかハエが重要な役割を占めているのである。かくして、この「擬態する花」にも動物の死体や糞に擬態した極めつけに「臭い花」が存在するのだ。

### カンアオイ属の「擬態する花」の実態解明を目指して

この「擬態する花」を咲かせる植物の代表例にウマノスズクサ科カンアオイ属(以下カンアオイと表記した場合はこの仲間全般を指す)がある。これは日本列島を進化の舞台とする野生植物の中でも、最も顕著な多様化を遂げたグループの一つで、約50種もの日本固有種が知られている。

カンアオイの花は葉の陰に隠れ、しばしば落葉に覆われた状態で地面に咲くという風変わりなものである(図2A)。形態的にも奇妙で、ふつう花卉

はなく、代わりに萼が筒状に発達して萼筒を形成し、その中に雄しべや雌しべは完全に隠されており、萼筒中央の開口部からのみこれらの花器官にアクセスが可能となっている(図2B)。なお、送粉者を一時的に内部に閉じ込めるような構造は「擬態する花」に典型的なものである。

このように非常に興味深い存在でありながら、カンアオイ属のほとんどの種で送粉者は調査されておらず、これらの花が本当に「擬態する花」なのか？ また何に擬態しているのか？ など、多くが未解明であった。筆者は、カンアオイ属が日本列島で顕著な多様化を遂げた要因に、多様な送粉者を騙す「擬態戦略」があるのではないかと考えている<sup>3</sup>。つまり「擬態する花」では、一般的な訪花性昆虫を誘引するという花の適応進化における制約から解放されているため、ふつうは花を訪れることがない昆虫(例えばショウジョウバエ類)も送粉者のレパートリーに含まれることがあり、その結果、風変わりな性質をもったものが多様に進化したのではないかという着想である。

このことを確かめるために、筆者は2010年からカンアオイ属において送粉者をめぐる生物学的特性の網羅的な調査を行ってきた。特に、カンアオイのそれぞれの種がどのような昆虫に送粉されているかは大変興味深く、これまでに20種あまりで野外調査を重ねてきたが、これがなかなか困難なのである。

カンアオイの送粉者調査の困難の一つは、適切な開花期を見極めるのが難しいことにある。カンアオイの花は開花後、非常に花持ちが良く、長いものでは数カ月にわたって形を維持してその場に残り続ける。しかしこのように見かけ上長寿な花でありながら、実際には開花後7~10日間程度しか繁殖能力をもたず、この間しか送粉者も誘引されないのである。ところが困ったことに、雄しべも雌しべも萼筒内に隠されており外から

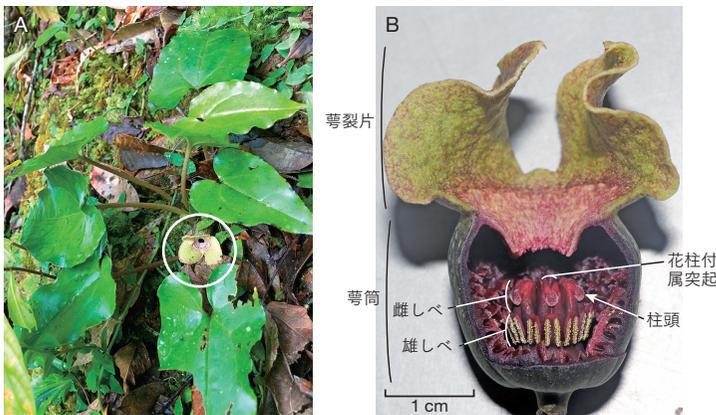


図2—フジノカンアオイ  
A：自生地で開花した姿 B：花の内部構造。萼筒の一部を縦に切った断面を示している。

視認できないカンアオイの花では、この繁殖能力のある状態かどうかを外見から見分けるのは極めて困難であり、花の前で送粉者の訪れを待っていても無駄骨、ということがしばしば起きる。この対策としては、まだ蕾がついている株を観察するしかない。蕾と開いた花が混在している株は、開花してから間もないものである可能性が高いからである。

また、多くの場合、送粉者の訪花頻度が少なく、しかも花の内部に入ってしまうと送粉者の姿が見えない点も難儀である。送粉者の観察ではデジタルカメラ(リコー社のデジタルカメラWGシリーズはこの目的のために便利で愛用している)のタイムラプス撮影機能を使うことで無人化でき、また同時に何株もの観察ができるのだが、カンアオイの花においてはせっかく訪れた送粉者がすぐに花の中に入ってしまうため、ただでさえ頻度が低い貴重な訪花の瞬間を撮り逃してしまう、あるいは送粉者の姿がうまく捉えられていない、ということもしばしばなのである。

石の上にも三年ということわざもあるように、いろいろと困難が多いカンアオイの送粉様式に関する研究であっても、10年以上続けているといういろいろなことが分かってきた。まず、花の中に潜り込んで体表に花粉をつけ、花から出て行くというように明白に送粉者として働いている様子が確認できたのは、ほとんどの場合ハエの仲間であった。すなわち、確認できた限りにおいてはカンアオイの花は全てハエを騙す花であるらしい。さらにカンアオイの種ごとに、送粉者となるハエの種は異なるようで、またその多くはノミバエのように通常花を訪れることはない昆虫であった。

なおカンアオイ属の送粉者はヤスデやナメクジ、あるいはアリなどの地上徘徊性の無脊椎動物ではないかとしばしば言われてきたが、これらの動物は時折花を訪れる(しばしば繁殖期を終えた花にも訪れる)ことはあっても送粉者としてはほとんど働いていないようである。

ところでカンアオイの花に騙されるハエの中には、萼筒の中に産卵するものがある(産卵場所擬態)。



図3—オナガカンアオイ

送粉者が花を訪れる頻度が低く、これを直接捕獲することが困難なカンアオイの花において、萼筒内に産み残された卵はその母親が花を訪れた動かぬ証拠となる。この卵からDNAを抽出し、分析することで(DNAバーコーディング)、送粉者の正体を突き止めることに成功したケースもあった。

一方で、数日粘って観察してみた、というくらいでは送粉者らしきものがほとんど確認できなかった種も多い。例えば萼裂片が長く伸びる著しく奇妙な姿の花を咲かせるオナガカンアオイ(図3)を観察したケースでは、筆者らは2株を一昼夜調査したが、ほとんど訪花昆虫を確認することができなかった<sup>4</sup>。別の研究では3年間のべ15日間にわたって調査集団全体で念入りの訪花昆虫の採集を試みて、ようやく送粉者となりうるハエ20個体の採集に成功している<sup>5</sup>。

結果として、日本に50種以上の種が知られているカンアオイ属にあって、送粉者が解明できている種はまだ少数に過ぎない。このような調査は、筆者の研究室だけで網羅するのは実際問題なかなか難しいので、本稿で興味をもたれた読者は、ぜひ身近な場所に自生する種の送粉者の調査に挑戦してその全貌の解明に貢献していただければと思う。

## カンアオイの花はなぜ香るのか？

カンアオイ属の花の多くは「ハエを騙す花」であるらしいということが次第に明らかになってきたわけだが、なぜハエが騙されるのか、あるいは花はどのようにしてハエを騙しているのか、というのが次なる疑問として湧いてくる。先述のとおり、カンアオイ属の花は、咲いていることすら分かりにくいような状態で地際に咲くのが特徴であり、このような花にハエが誘引されるのだとすると、花の香りに誘われている可能性が高い。

そこで、送粉者の調査と並行してカンアオイ属の花で網羅的に花の香りの調査を行ってきた。カンアオイ属は、英名で wild ginger と呼ばれることから分かるように、植物体全体にスパイスのような強い芳香がある。このためしばしばこれが花の香りとして誤解されているが、実際には花からは全く異なる香りが放たれており、種によって実に様々で特徴的な花の香りがあることに研究を始めるとすぐに気づいたのだった。

これまでこのことがほとんど認識されていなかったのは、先ほども述べたとおり、カンアオイ属の花が繁殖能力を失った後も長く形が保たれており、その一方で花に特徴的な香りを出すのはあくまで繁殖能力のある開花後すぐの間だけだということが原因だと考えられる。この時期を過ぎた花からは、植物体全体と同じ香りがするのみであるため、本来の花の香りには気づきにくいというわけだ。ちなみに地際に生えていることもあって花の香りが分かりにくい(どうしても花の香りが土の匂いに紛れてしまう)カンアオイ属の花だが、花を小さな瓶に入れてから嗅ぐと、はっきりその香りが分かるので、自宅で栽培されているなどで開花したばかりの花を得る機会があればぜひ試していただきたい。

さて、カンアオイ属の花の香りだが、果実のような芳香のあるもの、乾いた腐肉のようなもの、あるいは独特の薬品臭のものなど実に様々であり、これはまさにこれまでの送粉者の調査でそれぞれ

の種が異なるハエを騙していると考えられることと整合的であった。しかし問題は、カンアオイ属の送粉者となるハエのほとんどについて、その生態、つまり成虫は何を餌として何に集まり、どこに産卵し、幼虫は何を食べるのか、が全く不明なことである。つまり、カンアオイ属の「擬態する花」が、一体何に擬態してハエを騙しているのか、言い換えれば送粉者となるハエは一体どのような理由で花に誘引されているのかがほとんどの場合見当もつかないということになる。

しかし発想を変えれば、特定の香り成分を放出するカンアオイ属の花にこの種類のハエが誘引される、という観察事実、そのハエの生態を理解する上で大きなヒントになるかもしれない。つまり例えばハエの産卵場所や採餌場所になりそうなもの(キノコ、動物の糞、動植物の遺骸等)を片っ端から集めて、その香り成分を調べ、カンアオイの花の香りとの共通性を探る、というアプローチでカンアオイ属の花が何に擬態しているのかを推定する、というのは有力な方法であり、これに目下取り組んでいるところである。このような取り組みは地道なデータの蓄積が必要で簡単なことではないが、カンアオイ属の花が擬態するもの(モデル)にはどのようなものがあり、その擬態はどの程度精巧なのか、それぞれのモデルにどのようなハエが対応しているのかが解明できれば、なぜ日本列島でカンアオイの仲間がこれほど多様化したのか、そこにハエの仲間の多様性や生態がどのように関係しているのか、という興味深い謎については答えることができると期待している。

## カンアオイの花の香りの多様性

さて、実際のところカンアオイ属の花の香りは極めて複雑で、一つの花から数十種類もの香り成分が出ているということも珍しくない。この中でもいくつか特徴的な香り成分をその種別ごとに紹介しよう。まず一つ目のカテゴリーは短鎖脂肪酸エステル類である。これは多くの場合カンアオイ属の花の果実香に関与している成分で、ヤエヤマ



図4—カンアオイの仲間の花の多様性

A: ヤエヤマカンアオイ B: ヤクシマアオイ C: カントウカンアオイ D: タニムラアオイ E: オオバカンアオイ F: ハツシマカンアオイ G: マルミカンアオイ H: ズソウカンアオイ I: ランヨウアオイ J: ミヤコアオイ

カンアオイの花(図4A)の甘い香りの成分2-メチル酪酸エチルなどが代表的な例である。これは果実に誘引されるショウジョウバエ類などの送粉者と関係している可能性がある。時にヤクシマアオイ(図4B)の花の主成分であるメタクリル酸エチルのように強い薬品臭となるものもあるが、この成分がどのような昆虫の生態と関係しているのかは不明である。

モノテルペン類は、カンアオイ類の植物体全体から出る爽やかな芳香物質と共通するピネン、サビネン、カンフェンといった炭素数10の成分であるが、カントウカンアオイ(図4C)などの一部の種では花から特にこれらの成分が多く出ており、送粉者と関係している可能性が高い。またタニムラアオイ(図4D)などでは花に特有のユーカリプトルなどのモノテルペンが多く放出されており、やはり爽やかな芳香があるが、これがどのような昆虫の生態と関係しているのかは未解明である。

セスキテルペン類はベータカリオフィレンなどの炭素数15の成分で、木材などを想起させる香り成分である。多くのカンアオイ類の花がこの成分を放出し、オオバカンアオイ(図4E)やハツシマカンアオイ(図4F)などの花ではこれらが香りの主成分となる。セスキテルペン類は物質の多様性が大きい成分であり、また同一の化学式であっても

取りうる化学構造が著しく多いため物質同定が極めて困難なのが研究上大きな障害となっている。ただ植物由来で放出されることが多い成分であるため、朽ちた植物質あるいは木材腐朽菌などの菌類を好む送粉者と関係する成分である可能性がある。

含硫黄化合物、これはその名のとおり硫黄原子を含む物質であり、ジメチルスルフィド、ジメチルジスルフィド(DMDS)などがカンアオイ属の花では代表的な物質である。前者は海苔のような磯臭い香りであり、後者は乾いた腐肉のような動物質の香りとなる。これらは動物質が腐敗したものと関連していることが多いが<sup>6)</sup>、トリュフ類の香りの主成分としても知られている<sup>7)</sup>。したがって獣糞や腐肉を好む昆虫の誘因に関与している可能性が高いが、菌食性のハエ類もこのような成分に反応するかもしれない。なお、これらの成分が多いと、典型的な「臭い花」となり、カンアオイ属ではフジノカンアオイ(図2)、マルミカンアオイ(図4G)、ズソウカンアオイ(図4H)、ランヨウアオイ(図4I)など、特にDMDSを花の香りの主成分とする種が多く存在する。

これらの成分の他に、4-メチル1,3-ペンタジエンといった短鎖の不飽和炭化水素を多く出すミヤコアオイ(図4J)などの種も存在するが、この成

分がどのような昆虫と関与しているのかはやはり全く不明である。

## 花の香り研究で生態と遺伝子をつなぐ

ここまで見てきたように、カンアオイ属は50種近い日本固有種を擁するという他に類を見ない多様性を誇り、これが「擬態する花」で様々なハエを騙す、という生活史戦略と密接に関わっている可能性がある。そして先に述べた様々な香り成分のそれぞれが、この擬態戦略のメカニズムの中核である可能性が高い。さらに、この香り成分は花の組織の中で生化学的に生み出されるものであり、それは花で発現する遺伝子の働きで制御されているはずである。例えば花の香り物質を生合成する酵素はいずれも、花で発現する遺伝子にコードされている分子であると考えられる。このように、送粉者との関係性を決める物質的因子である花の香り成分の組成が、極めて近縁なカンアオイの種間で大きく異なっており、しかもそれが究極的には遺伝子としてそれぞれの植物のゲノムの中にコードされているはずである、という状況は筆者にはとても魅力的である。なぜなら冒頭で述べたとおり、花の多様性が送粉者の多様性によって形作られるプロセスやメカニズムを、植物の生態からそれを支配する遺伝子のレベルまでつなげて実証できる類まれな研究モデルになるはずであるからだ。

そこで筆者は、上記のカンアオイの花の顕著な多様性を構成する様々な香り成分について、その組成を支配する遺伝子の特定を目指している。その一環としてたどり着いたのが、「臭い花」はなぜ臭いのかという問いの答え、すなわち花の臭いにおいの主成分であるDMDSの生合成メカニズムの解明'だったというわけである。この研究例から分かることは(研究の詳細については最近オープンアクセスの和文総説で紹介したためそちら<sup>9</sup>を参照されたい)、DMDSのような「虫を騙す香り」を花が新たに獲得する進化が、どのような遺伝子のどのような突然変異によってもたらされたかについて、塩基

配列のレベルで解明しようということである。

なお、残念ながらこの突然変異自体はカンアオイの仲間の共通祖先で生じたものであることが判明したため、種間、あるいは個体間のレベルで花の香り組成を変化させるような遺伝的変異については現在のところ特定に至っていない。しかし今後、カンアオイの種あるいは個体レベルでの花の香りの違いを左右する遺伝的変異が突き止められれば、野外での植物と送粉者の関係性の違い、あるいは植物個体間での送粉者誘引能力の違いやそれによる繁殖成功の大小といった進化生態学的な観測値をこの遺伝的変異と直接関連づけることができるようになり、そこには特定の花の香りが寄与していることを証明できるだろう。また、このような花の香り組成を支配する遺伝子領域について、集団の遺伝子頻度を時空間的に解析することで、その進化プロセスをリアルタイムで追跡することも可能になるかもしれない。これにより、究極的には花の多様性がどのように生じ、また維持されるかといった問題について深い洞察が得られると期待している。

野山で出会う花の香りを一つ一つ確かめながら、2億年以上昔から続く花と昆虫の共進化の悠久のドラマを紐解く営みは、まだ始まったばかりである。

### 文献

- 1—Y. Okuyama et al.: *Science*, **388**, 656(2025)
- 2—J. Ollerton et al.: *Oikos*, **120**, 321(2011)
- 3—Y. Okuyama & S. Kakishima: *Pop. Ecol.*, **64**, 130(2022)
- 4—S. Kakishima & Y. Okuyama: *Bull. Natl. Mus. Nat. Sci.*, **B**, **44**, 41(2018)
- 5—D. Takahashi et al.: *Plant. Biol.*, **24**, 987(2022)
- 6—A. Jürgens & A. Shuttlesworth: in *Carion Ecology, Evolution, and Their Applications*, M. E. Benbow et al. eds., CRC Press (2015) pp. 361–386
- 7—F. Pelusio et al.: *J. Agric. Food Chem.*, **43**, 2138(1995)
- 8—奥山雄大: *植物科学最前線*, **16**, 107(2025)